

Выводы

1. Предложен метод инициирования электрического разряда в проводящих средах, заключающийся во включении рабочего промежутка в зарядную цепь генератора импульсов.
2. Показано, что инициирование разряда при производстве электронабивных свай позволяет на

20...30 % уменьшить предпробивные потери энергии и, соответственно, уменьшить величину запасаемой энергии в генераторе импульсов.

3. Разработана технология производства электронабивных свай, и создана установка HDVID 50, которая прошла успешные испытания в г. Чанчунь (КНР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов В.С., Егоров А.Л., Борисенков В.И. Набивные сваи, изготовленные по электроимпульсной технологии // Проектирование и инженерные изыскания. – 1991. – № 2. – С. 17–19.
2. Балохин Б.В., Джантимиров Х.А. Новые электроразрядные технологии в геотехническом строительстве // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 4–5. – С. 47–52.
3. Курец В.И., Юшков А.Ю. Производство набивных свай и анкеров с использованием электрических импульсных разрядов // Известия Томского политехнического университета. – 2006 – Т. 309. – № 2. – С. 76–79
4. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 206 с.
5. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. – Киев: Наукова думка, 1983. – 272 с.

Поступила 22.03.2012 г.

УДК 004.9+621.317.3

**ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
НА БАЗЕ PXI-ПЛАТФОРМЫ**

С.В. Силушкин, С.В. Муравьев, Ю.М. Фомичев, Е.Ю. Емельянова

Томский политехнический университет
E-mail: slavasv@mail.ru

Обсуждается реализация модульного измерителя электрической мощности сигналов сложной формы на базе модульной PXI-платформы, которая позволяет проводить измерение электрической мощности синусоидальных и несинусоидальных сигналов, т. е. проводить оценку качества электроэнергии. Предложены и реализованы структурная схема модульного измерителя мощности и решения по его программному обеспечению.

Ключевые слова:

Электрическая мощность, качество электроэнергии, PXI-платформа, цифровая обработка сигналов.

Key words:

Electric power, power quality, PXI Platform, digital signal processing.

Введение

Измерение мощности синусоидальных и несинусоидальных сигналов является актуальной задачей, т. к. способствует принятию правильных решений при формировании планов мероприятий по энергосбережению. Кроме коммерческих потерь в энергетических сетях имеются технологические потери, важной составляющей которых являются потери, связанные с неудовлетворительным качеством электроэнергии, к которым относят следующие ее показатели: отклонение напряжения, колебания напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия напряжений, провал напряжения и др. [1–3]. Поэтому для правильного учета потребленной электрической энергии необходимо иметь приборы, регистрирующие показатели качества электроэнергии и, в частности, различные виды мощности соответствующих сигналов.

Обзор приборов анализа качества электроэнергии показывает, что в настоящее время выпускаются средства измерений, позволяющие проводить энергетические обследования в электрических сетях и системах электроснабжения и сочетающие в себе широкий спектр функциональных возможностей (проверка систем учета электроэнергии и регистрация графиков активной и реактивной мощностей, а также графиков изменения напряжения и др.).

До настоящего времени большая часть оборудования проектировалась под синусоидальные источники напряжения и линейные нагрузки таким образом, чтобы ток был синусоидальным. Вопросы определения неактивной мощности в несинусоидальных режимах до сих пор являются предметами полемики и дискуссий [4–6].

В статье обсуждается реализация модульного измерителя мощности с аналого-цифровым преоб-

разованием входных сигналов и последующей их цифровой обработкой.

1. Выбор метода измерения мощности

Общеизвестные подходы к определению мощности электрических сигналов, как правило, применимы только для строго синусоидальной формы сигнала. В отличие от классических методов цифровой метод, основанный на дискретизации сигнала по уровню и времени, позволяет рассчитывать мощность для любой формы сигнала. Если напряжение и электрический ток являются периодическими функциями времени с одинаковым периодом, то напряжение и электрический ток могут быть представлены посредством разложения в ряд Фурье. Активную P , полную S и реактивную Q мощности рассчитывают с учетом гармонических составляющих [7].

Следует заметить, что единого подхода к расчету реактивной мощности для несинусоидальных условий не существует, например, Международной электротехнической комиссией рекомендован один из подходов, описанный в [8]. В работах [9–11] обсуждается справедливость методов расчета реактивной мощности, однако разночтения в подходах не устранены до сих пор.

Из-за возможности различных трактовок понятия реактивной мощности до сих пор не существует общепринятого определения этого понятия. Поэтому при разработке цифрового измерителя мощности в данной работе было решено вычислять реактивную мощность в соответствии с наиболее распространенными определениями: по К. Будеану [12] и по С. Фризе [13].

2. Аппаратная реализация цифрового измерителя мощности

Современные устройства, предназначенные для измерения мощности, проектируются на базе микропроцессорных систем, в которых входные сигналы преобразуются в массивы мгновенных значений токов и напряжений, что позволяет реализо-

вать цифровые средства измерений мощности как при синусоидальных, так и несинусоидальных сигналах.

На данный момент промышленностью выпускаются различные цифровые средства измерений – вольтметры, амперметры, осциллографы – как в автономном, так и в модульном исполнении. Например, компания National Instruments (США) выпускает модули в стандарте PXI [14], которые можно использовать для создания систем измерения мощности на основе цифровой обработки сигналов.

На основе метода проектной компоновки была разработана структурная схема цифрового измерителя мощности ЦИМ-1.1 (далее – ЦИМ 1.1), рис. 1.

В состав ЦИМ-1.1 входят следующие блоки:

1. ИД – индуктивный делитель уменьшает входное напряжение U_0 до уровня U_1 для оцифровки.
2. Шунт или трансформатор тока (ТТ) – преобразует ток I_0 в напряжение U_2 , с соответствующим коэффициентом преобразования для последующей оцифровки.
3. PXI-1031 – модульная платформа компании National Instruments (США), в которой подключаемые модули соединяются между собой шиной PCI:
 - PXI-5124 – двухканальный цифровой осциллограф (Канал 0 и Канал 1), который может быть синхронизирован сигналом синхронизации (СС), подаваемым на вход внешней синхронизации «Триггер». Технические характеристики приведены в [15];
 - PXI-8331 – контроллер интерфейса с персональным компьютером через мост MXI-4, для управления модулями PXI;
 - ПК – персональный компьютер, на котором устанавливается программное обеспечение для управления модулями PXI и обработки результатов измерений.

На рис. 2 показан ЦИМ-1.1 в режиме работы с сигналами тока и напряжения, не имеющими искажений. В комплект ЦИМ-1.1 включены токовый



Рис. 1. Структурная схема цифрового измерителя мощности ЦИМ-1.1

шунт, индуктивный делитель ДИ-3 и модульная платформа PXI-1031 с цифровым осциллографом PXI-5124.

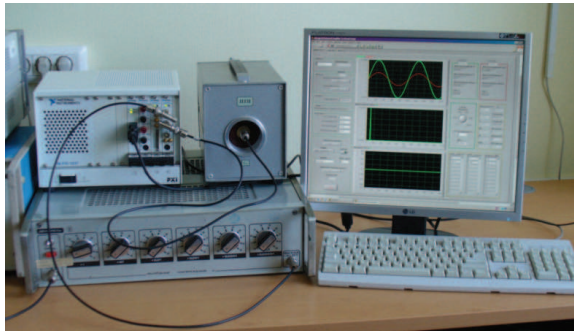


Рис. 2. ЦИМ 1.1 в комплектации с токовым шунтом и индуктивным делителем, модульной системой PXI и персональным компьютером

Алгоритм работы ЦИМ-1.1

Принцип работы ЦИМ описывается следующим алгоритмом:

1. На трансформатор тока (шунт) и индуктивный делитель подаются входные сигналы тока и напряжения соответственно, которые приводятся к стандартным уровням входных напряжений АЦП осциллографа PXI-5124. «Канал 0» осциллографа используется как канал измерения напряжения, а «Канал 1» – канал измерения тока.

2. Входные сигналы преобразуются в цифровой код при помощи двух независимых АЦП. При этом можно использовать как внешнюю, так и внутреннюю синхронизацию сигналов, или производить некогерентную выборку сигналов с последующей записью и обработкой.
3. Цифровые коды сигналов передаются при помощи контроллера интерфейса PXI-8331 и моста MXI-4 для дальнейшей обработки в персональный компьютер.
4. Обработка результатов измерений, полученных с аппаратной части ЦИМ-1.1, проводится в виртуальном приборе «Цифровой измеритель мощности», рис. 3.

3. Виртуальный прибор

«Цифровой измеритель мощности»

Программное обеспечение измерителя мощности ЦИМ-1.1 разработано в среде LabVIEW 2009 компании National Instruments [16] и выполнено в виде виртуального прибора, который позволяет формировать параметры проведения эксперимента, управления осциллографом PXI-5124, сохранения данных, проводить расчет мощностей по различным алгоритмам, а также графически представлять результаты эксперимента на экране монитора в реальном времени. На рис. 3 приведен внешний вид виртуального прибора «Цифровой измеритель мощности».

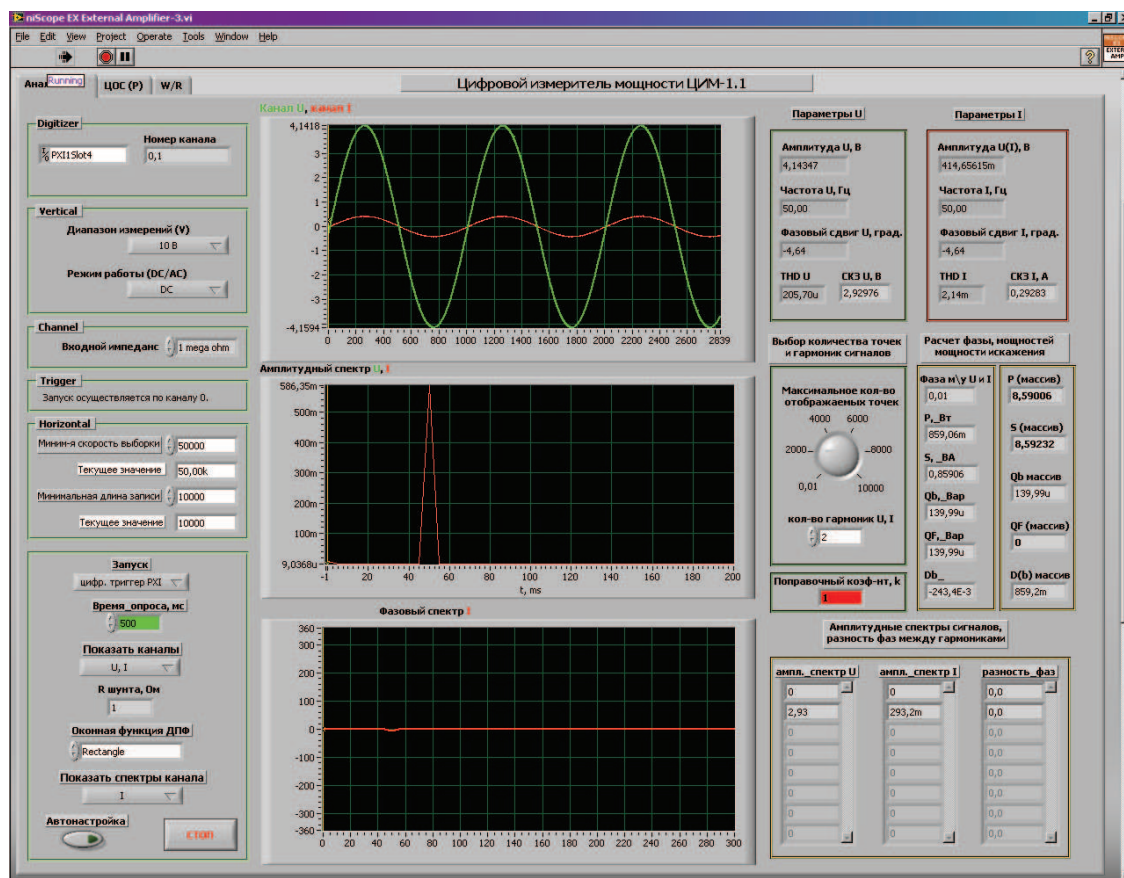


Рис. 3. Виртуальный прибор «Цифровой измеритель мощности». Исследуемые сигналы тока и напряжения без искажений

На рис. 3 показаны сигналы тока и напряжения, не имеющие высших гармоник. Разработанный виртуальный прибор может работать в трех режимах:

1. «Анализ U и I» — настройка и выбор измерительных каналов, измерение параметров сигналов тока и напряжения, визуализация полученных данных в окнах «Параметры U» и «Параметры I».
2. «ЦОС (P)» — цифровая обработка сигналов сложной формы и представление их в виде осциллограмм, проведение расчетов всех видов мощности.
3. «W/R» — запись и воспроизведение из базы данных результатов измерений, обработка некогерентной выборки сигналов, расчет мощностей и параметров сигналов.

Переход между режимами работы ЦИМ-1.1 осуществляется выбором соответствующей закладки: «Анализ U и I», «ЦОС (P)» и «W/R».

4. Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного ваттметра

Разработанный цифровой измеритель мощности ЦИМ-1.1 позволяет измерять следующие параметры сигналов: амплитудные (действующие) значения тока и напряжения; фазовый сдвиг между током и напряжением; частоту гармонических сигналов; активную, реактивную и полную мощности как синусоидальных, так и несинусоидальных сигналов (дополнительно рассчитывается мощность искажения); коэффициент гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой).

Измерение действующих значений напряжения

Исследовались погрешности измерения действующего значений напряжения, для чего был использован калибратор Fluke 5520A как источник входных сигналов напряжения в диапазоне частот от 0,020 до 50 кГц, а мультиметр Agilent 3458A — как рабочий эталон для измерения значений напряжения. Диапазон измеряемых напряжений $U_0=0,5...30$ В. Относительная погрешность измерений значений напряжения рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{X_{\text{изм.}} - X_{\text{э.}}}{X_{\text{э.}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $X_{\text{изм.}}$ — показания ЦИМ-1.1, В; $X_{\text{э.}}$ — показания мультиметра, В.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Погрешность измерений значений напряжения в частотном диапазоне, %

Напряжение U_0 , В	Частота сигнала f , кГц							
	0,02	0,05	1	10	20	30	40	50
0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8
10	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7
30	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8

Результаты измерений, приведенные в табл. 1, показали, что погрешность измерений значений напряжений не превышает 1 %, т. е. не выходит за пределы установленных в технической документации на PXI-5124 [15].

Измерения значения тока, фазового сдвига между током и напряжением

В эксперименте определены погрешности измерений значений тока и фазового сдвига между током и напряжением. Как источник входных сигналов напряжения и тока, фазового сдвига в диапазоне частот от 0,045 до 10 кГц использован калибратор Fluke 5520A. Измерения значений фазовых сдвигов производились при помощи фазометра Ф2–34. Измеряемые значения тока 1 и 2 А. Относительная погрешность измерений значений тока рассчитывается по формуле (1), в которой: $X_{\text{изм.}}$ — показания ЦИМ-1.1, А; $X_{\text{э.}}$ — установленные значения тока на выходе калибратора, А.

Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Погрешность измерений значений тока в частотном диапазоне, %

Ток I_0 , А	Частота сигнала f , кГц					
	0,045	0,060	1	3	5	10
1	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8
2	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,7

Для измерения погрешности фазового сдвига устанавливались фазовые сдвиги между входным током и напряжением $\varphi=30^\circ$ и $\varphi=60^\circ$. Абсолютная погрешность измерений значений фазовых сдвигов рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{изм.}} - \varphi_{\text{э.}}$$

где $\varphi_{\text{изм.}}$ — показания ЦИМ-1.1, град.; $\varphi_{\text{э.}}$ — установленные значения фазового угла на выходе калибратора, град.

Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Погрешность измерений значений фазовых сдвигов в частотном диапазоне, град.

Значения фазового сдвига $\varphi_{\text{э.}}$, град.	Частота сигнала f , кГц					
	0,045	0,060	1	3	5	10
30	0,25	0,18	0,22	0,3	0,4	0,5
60	0,12	0,12	0,16	0,3	0,4	0,5

Результаты измерений действующих значений тока и фазовых сдвигов между током и напряжением показывают, что они не превышают допустимое значение основной погрешности PXI-5124 [15].

Измерение активной, реактивной и полной мощностей

В эксперименте определены погрешности измерений значений активной, реактивной и полной мощностей в диапазоне частот от 0,045 до 10 кГц.

В данном эксперименте калибратор Fluke 5520A использовался как источник входных сигналов на-

пряжения и тока, фазового сдвига в диапазоне частот от 45 Гц до 10 кГц. Диапазон измеряемых напряжений $U_0=0,5...30$ В. Измеряемые значения тока 1 и 2 А.

Результаты измерений представлены в табл. 4, 5 для фазовых сдвигов между сигналами тока и напряжения 0 и 45°.

Таблица 4. Результаты измерений мощности при фазовом сдвиге $\varphi=0^\circ$

$P=30$ Вт, $\varphi=0^\circ$						
f , Гц	50	60	400	1000	5000	10000
$P_{изм}$, Вт	29,99	29,98	29,98	29,96	29,94	29,99
δ_p , %	0,03	0,07	0,07	0,14	0,2	0,03
$P=60$ Вт, $\varphi=0^\circ$						
$P_{изм}$, Вт	60,10	60,10	60,10	60,10	59,90	60,00
δ_p , %	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	0,17	0,00

Таблица 5. Результаты измерений мощности при фазовом сдвиге $\varphi=45^\circ$

$S=60$ ВА, $\varphi=45^\circ$, $P=42,426$ Вт, $Q=42,426$ Вар						
f , Гц	50	60	400	1000	5000	10000
$P_{изм}$, Вт	42,19	42,22	42,4	42,36	42,1	42,0
δ_p , %	0,6	0,5	0,06	0,16	0,8	1,0
$S_{изм}$, ВА	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,1
δ_s , %	0	0	0	0	0	-0,17
$Q_{изм}$, Вар	43,17	43,17	43,17	43,17	43,17	43,17
δ_Q , %	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8

Результаты экспериментов показывают, что измерения мощностей зависит от частоты сигналов и фазового сдвига между током и напряжением. Реактивная мощность имеет наибольшую погрешность до 1,8 %, в то время как максимальная погрешность измерений активной и полной мощностей не превышает 1 %.

Измерение активной, реактивной и полной мощностей несинусоидального сигнала

Схема эксперимента для измерения мощностей искаженного сигнала приведена на рис. 4.

Для измерения мощностей несинусоидального сигнала использовался калибратор Fluke 5520A, с выхода U которого берется основная гармоника входного сигнала U_1 , которая через фазовращатель с дополнительным фазовым сдвигом φ_1 (U'_1) подается на первый вход суммирующего усилителя. На второй вход суммирующего усилителя с выхода калибратора I задается соответствующая гармоника U_n . При помощи суммирующего усилителя формируется несинусоидальный сигнал U_Σ , который поступает на канал тока ЦИМ-1.1.

Амплитуда U'_1 измеряется мультиметром, а фазовый сдвиг φ_1 – фазометром. Измерения проводились при значениях силы тока 30 А.

В проведенном эксперименте использовались следующие значения: $U_1=3$ В; $U_n=300$ мВ; $A=10$ А/В; $\varphi=30^\circ$; $S_{расч.}=90,9$ ВА; $P_{расч.}=78,72$ Вт; $Q_{расч.}=45,45$ Вар.

Результаты измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты измерений мощности несинусоидального сигнала для основной частоты 50 Гц и значения относительной погрешности результатов измерений

Определяемые значения	Частота высшей гармоники тока, Гц			
	150	250	350	450
$S_{изм.}$	90,74	90,71	90,69	90,65
δ_s , %	0,17	0,21	0,23	0,28
$P_{изм.}$	78,28	78,10	78,05	78,02
δ_p , %	0,6	0,8	0,9	0,9
$Q_{изм.}$	45,28	45,18	45,21	45,19
δ_Q , %	0,4	0,6	0,5	0,6

Погрешность результатов измерений, приведенных в табл. 1, не превышает 1 %, что позволяет

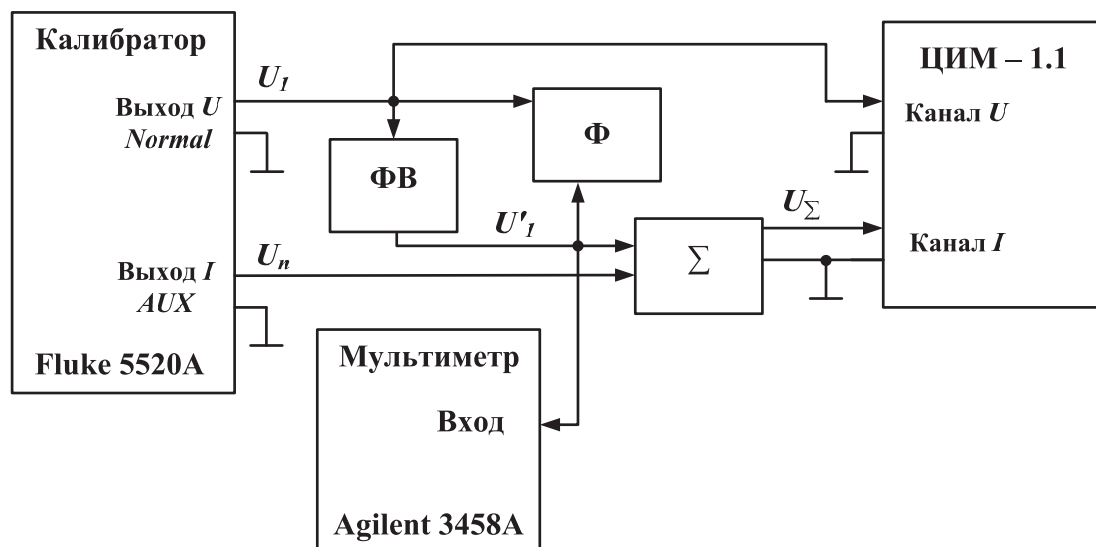


Рис. 5. Схема эксперимента для измерения активной, реактивной и полной мощностей несинусоидального сигнала: ФВ – фазовращатель; Ф – фазометр Ф2-34; Σ – суммирующий усилитель

сделать вывод о возможности использования разработанного измерителя мощности в случаях, когда измеряемые сигналы не являются синусоидальными.

Заключение

Предложена и аппаратно реализована структурная схема цифрового измерителя мощности ЦИМ-1.1, позволяющего определять амплитудное и действующее значения тока и напряжения; фазовый сдвиг между ними; частоту гармонических сигналов; активную, реактивную и полную мощности для синусоидальных и несинусоидальных сигналов (дополнительно рассчитывается мощность искажения), рассчитывать мощность, коэффициент искажения синусоидальности кривой.

Разработанный измеритель мощности имеет модульную структуру, поэтому его можно адаптировать к требованиям заказчика, а его параметры могут быть улучшены путем добавления новых мо-

дулей обработки сигналов в состав программного обеспечения или замены аппаратных модулей другими модулями с более высокими метрологическими характеристиками.

Экспериментально показано, что разработанный ЦИМ-1.1 обеспечивает измерение мощности сигналов в частотном диапазоне от 0,020 до 50 кГц с погрешностью до 1 % для активной и полной и до 2 % для реактивной мощностей.

Разработка цифрового измерителя мощности (ЦИМ) выполнена в рамках проекта «Прецизионные резистивные и индуктивные преобразователи с улучшенными характеристиками» (5 этап Государственного контракта № П487 от 13 мая 2010 г. по направлению «Создание электронной компонентной базы» в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», мероприятия 1.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук», направления 1 «Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. с 1999-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 61 с.
- ГОСТ Р 8.655-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Общие технические требования. – Введ. с 2010-07-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 37 с.
- ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения. – Введ. с 1989-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 27 с.
- Демирчян К.С. Разложение мгновенной мощности на составляющие // Известия РАН. Энергетика. – 1994. – № 5. – С. 5–8.
- Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
- Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // IEEE Trans. on Ind. Appl. – 1984. – V. IA-20. – № 3. – P. 625–630.
- Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Измерение мощности в звуковом диапазоне частот. – Л.: Энергия, 1980. – 168 с.
- IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, Std 100–1977. – American National Standards Institute/Institute of Electrical and Electronics Engineers (ANSI/IEEE), 1977. – 882 p.
- Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
- Баков Ю.В. Мощность переменного тока. – Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та, 1999. – 252 с.
- Асанбаев Ю.А., Касаточкин А.А. Об определении составляющих мощности в несинусоидальных процессах // Известия НИИ постоянного тока. – 2002. – № 59. – С. 144–160.
- Budeanu C.I. Puissances reactives et fictives // Inst. Romain de l'Energie, Bucharest. – 1927. – Pub. № 2.
- Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with non sinusoidal voltage and current // Przegl. Elektrotech. – 1931. – № 7. – P. 193–203; – № 8. – P. 225–234; 1932; – № 22. – P. 673–676.
- PXI Platform. 2012. URL: <http://www.ni.com/pxi> (дата обращения: 22.06.2012).
- NI PXI/PCI-5124 Specifications. 12-Bit 200 MS/s Digitizer. 2008. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371135h.pdf> (дата обращения: 22.06.2012).
- Тревис Дж. LabVIEW для всех. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 544 с.

Поступила 07.09.2012 г.